

Energieeinsparung durch Harmonisierung der Geschwindigkeiten im Soll-Fahrplan

Tilo Schumann, Michael Mönsters,
beide Deutsches Zentrum für Luft- und
Raumfahrt e.V. (DLR), Braunschweig, Institut
für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig

1 Untersuchungsziele

1.1 Hintergrund und Forschungsziele

Eisenbahnverkehrsunternehmen, insbesondere im Schienengüterverkehr, sehen sich einem immer stärkeren Kostendruck ausgesetzt. Mehrere Untersuchungen beziffern die Kostensteigerungen im Schienengüterverkehr von 2014 bis 2020 auf bis zu 20 % pro Zug-km. Neben Lärmsanierung, Einführung von ETCS, steigenden Infrastrukturentgelten sowie wachsenden Anforderungen an die Interoperabilität kommt es zu einer Zunahme der Energiekosten. Vor allem ordnungspolitische Maßnahmen des Bundes (Stromsteuer, EEG-Umlage) lassen den Bahnstrompreis bis 2020 um mindestens 15 % steigen. Dies entspricht einer Steigerung des Bahnstroms an den Produktionskosten von ca. 4 % [1, 2]. Vor diesem Hintergrund ist der energieeffiziente Bahnbetrieb ein weiterhin drängendes Thema.

Ein auf Effizienz ausgelegter Betriebsablauf kann auf drei Ebenen erreicht werden: Durch eine verbesserte Fahrweise (Schulung der Fahrer, autonome oder vernetzte Fahrerassistenzsysteme) [3], eine

Betriebsoptimierung (gezielte Disposition im gestörten Bahnbetrieb) [4] oder grundsätzlich durch die Erstellung eines energie günstigeren Fahrplans.

Die Einsparung von Traktionsenergie stand im Fokus des vorliegenden Arbeitspaketes des DLR-Projektes Next Generation Railway System (NGRS II) beim Institut für Verkehrssystemtechnik. Es geht einher mit einer Reduzierung von Verschleiß sowie einer Lärminderung. Die Streckenkapazität kann ebenfalls positiv beeinflusst werden.

Der vorliegende Beitrag behandelt Ansätze zur Erstellung eines energieeffizienten Fahrplans. Ziel der Untersuchung ist eine Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs. Es wird somit in Kauf genommen, dass einzelne Züge auch mehr Energie benötigen können. Im Gegensatz zur Betriebsoptimierung sind Randbedingungen zu definieren, denn prinzipiell verbrauchen Fahrzeuge, die stehen oder langsam fahren, die wenigste Energie. Da das Ziel eines Eisenbahnbetriebs aber die Beförderung von Personen oder der Transport von Gütern ist und die Bahn dabei im Wettbewerb mit anderen Verkehrsträgern steht, ist die Reduzierung der Geschwindigkeit keine universelle Lösung. Daher gilt der Grundsatz, dass der Ausgangspunkt für einen effizienten Fahrplan der reale Fahrplan ist, der dann modifiziert wird. Hierfür wurde die Achse Hamburg – Hannover gewählt und

bearbeitet. Eine Verallgemeinerung der Aussagen ist nicht ohne weiteres möglich, allerdings handelt es sich bei der gewählten Strecke aufgrund der hohen Belastung um einen Korridor mit besonderem Handlungsbedarf. Es gibt in Deutschland weitere ähnlich hoch belastete Strecken mit vergleichbarem Zugmix (ICE, Regionalexpress, Güterverkehr), wie z.B. Offenburg – Basel oder Würzburg – Nürnberg. Im modellierten Sollfahrplan werden energieintensive Betriebsvorgänge analysiert und ein Lösungsraum zur Vermeidung oder Reduzierung derselben definiert. Anschließend wurde eine weitere Betriebsvariante mit umgesetzten Lösungen erstellt und die Ergebnisse einer wirtschaftlichen Bewertung unterzogen. Um Auswirkungen auf den Personenverkehr zu ermitteln, wurde auch ein Nachfragemodell verwendet.

2 Betrachtungen für den Raum Hamburg - Hannover

2.1 Auswahl der Strecke

Zur Durchführung der Untersuchung wurde ein geeigneter Untersuchungsraum mit einer stark ausgelasteten Mischverkehrsstrecke im deutschen Schienennetz ausgewählt.

Die Wahl der Strecke Hamburg – Hannover bot sich an, weil diese eine bedeutende Strecke im Schienengüterverkehr darstellt und der Abschnitt Stelle – Uelzen in den Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG als überlastet definiert ist [5]. Der Abschnitt ist zudem Bestandteil des EU-Güterverkehrskorridors 3 (Stockholm – Palermo). Die Strecke wird im Mischbetrieb mit Hochgeschwindigkeitsverkehr, Personenverkehr und Güterverkehr betrieben. Durch den Anstieg des Hafenhinterlandverkehrs [6] wird bereits seit Jahren mit einer Verschärfung der Kapazitätsprobleme gerechnet. Nur durch die Finanz- und die sich anschließende

Wirtschaftskrise traten die Entwicklungen nicht im vorhergesagten Tempo ein. Seit 2014 ist jedoch beim Hafenumschlag wieder der Vorkrisenstand von 2008 erreicht [7]. Die Strecke ermöglicht darüber hinaus die Betrachtung komplexer Knoten wie z.B. Lehrte und Hamburg-Harburg. Neben der Hauptstrecke sind auch alle für die Verkehrsbeziehungen relevanten Zulaufstrecken im Untersuchungsraum in begrenztem Maße mitbetrachtet worden.

2.2 Frühere Untersuchungen zur Bahnstrecke Hamburg – Hannover

Die Verbindung von Hamburg nach Hannover gehört bereits seit Jahrzehnten zu den stärker belasteten Bahnstrecken in Deutschland. Daher gibt es hier eine Reihe von Untersuchungen und Studien zu betrieblichen und infrastrukturellen Maßnahmen. Meist sind Auslastung und Engpasssituation der Anlass für eine Betrachtung.

1996 schlug Runge Maßnahmen zur Kapazitätssteigerung vor [8]. Dazu gehören heute bereits umgesetzte Vorschläge wie der Einsatz spurtstarker, schnellerer Züge im Nahverkehr, die durch Doppelstockwagen eine erhöhte Kapazität pro Zuglänge aufweisen. Die ICE-Züge in Tagesrandlage ersetzen die IC-Züge durch den Halt an den Mittelzentren der Strecke, was bei Runge als Übernahme von Nahverkehrsfunktionen vorgeschlagen wurde. Durch diese Maßnahmen und eine Reduzierung der Fernverkehrsgeschwindigkeit von 200 auf 160 km/h konnte in Simulationen eine Erhöhung der Zugleistung um 50 % bei konstanter Betriebsstabilität (Verspätungsentwicklung im Störfall) nachgewiesen werden. Die längere Fahrzeit im Fernverkehr soll sogar im Alltagsbetrieb durch die bessere Pünktlichkeit kompensiert worden sein. Ergänzt sei der Hinweis, dass die Simulation mit der hohen Zahl von vier Regionalzügen pro

Stunde und Richtung durchgeführt wurde und alle Güterzüge maximal 100 km/h fahren.

Neben der Harmonisierung der Fernzugsgeschwindigkeiten wird heute auch eine Harmonisierung der Güterzuggeschwindigkeiten auf 100 km/h gefordert [9], die neben einem Trassengewinn auch erheblich Energie einspart. Schnellere Züge sollten verlangsamt und langsamere wie der Erzzug Hamburg – Salzgitter könnten durch Reduzierung der Masse (kürzere Züge) beschleunigt werden.

Größtenteils Einigkeit herrscht darüber, dass die Steigerungen des Hafenhinterlandverkehrs in den nächsten Jahren so groß sein werden, dass mit betrieblichen Maßnahmen allein keine Lösung zu erreichen sein wird. Daher geht die Diskussion weniger um das Ob einer Neubau- oder Ausbaustrecke, sondern eher um das Wie (Y-Trasse, Güterverkehrsausbau, viergleisiger Ausbau Bestandsstrecke etc.) [6].

2.3 Modellierung der Infrastruktur

Die Untersuchung wurde mit der Eisenbahnbetriebssimulation RailSys durchgeführt. Mithilfe des Programms wurde die Strecke mikroskopisch modelliert, der Fahrplan erstellt und Energiebedarfe ermittelt. Die erforderlichen Informationen wurden aus einer Vielzahl von Quellen zusammengetragen. Dazu gehören z. B. das allgemein zugängliche Infrastrukturregister der DB Netz AG (mit Spurplänen für große Knoten), eisenbahnbezogenes Kartenmaterial sowie Streckenbeschreibungen aus der Fachliteratur.

Folgende Strecken wurden in das Modell integriert:

- Strecke 1255: Güterstrecke Meckelfeld – Hamburg-Süd,
- Strecke 1280: Güterstrecke (Buchholz –) Jesteburg – Hamburg-Harburg – Hamburg-Rothenburgsort (– Allermöhe),
- Strecke 1710: Hannover Hbf – Celle (über Langenhagen),

- Strecke 1720: Hannover Hbf – Lehrte – Hamburg-Harburg – Hamburg-Hausbruch (– Cuxhaven) (Kernstrecke des Untersuchungsraums),
- Strecke 2200: (Wanne-Eickel – Bremen –) Hittfeld – Hamburg-Harburg – Hamburg Hbf sowie
- Strecke 6899: (Stendal – Salzwedel –) Wieren – Uelzen.

Die modellierte Infrastruktur berücksichtigt bereits Ausbaumaßnahmen (drittes Gleis Stelle – Lüneburg) als auch kurzfristig durchgeführte Verbesserungen (z. B. Sofortprogramm Seehafenhinterlandverkehr: Neubau Veerßer Kurve in Uelzen [10]). Die Infrastruktur stellt den Ausbauzustand von Mitte 2014 dar.

2.4 Abbildung des aktuellen Fahrplans

Für die Erstellung des Personenverkehrsfahrplans wurden das Kursbuch der Deutschen Bahn AG (DB AG) des Jahres 2014 sowie Online-Fahrplanauskunftssysteme verwendet. Aus früheren DLR-Studien [11] und Daten des Bundesverkehrswegeplans [12] konnten wichtige Informationen zum Güterzugaufkommen und zu Güterzugtypen gewonnen werden.

Im betrachteten Fahrplan wurde ein vollständiger Betriebstag auf allen Strecken modelliert. Insgesamt wurden rund 500 Personenzüge und 350 Güterzüge in den Fahrplan eingearbeitet.

Als Simulationstag wurde ein Mittwoch im September 2014 ausgewählt, da bis Mitte 2014 noch umfangreiche Bauarbeiten auf relevanten Abschnitten der modellierten Strecken stattgefunden haben. So konnte auf Baufahrpläne verzichtet werden, die das Ziel der Untersuchung negativ beeinflusst hätten. Die Wahl des Wochentages bietet sich an, da der Mittwoch im Hinblick auf das Reisenden- und Verkehrsaufkommen einen guten Durchschnitt aller Wochentage darstellt.

Die Anzahl der Modellzüge wurde bewusst niedrig gehalten, um die Komplexität des

Modellzug	Zug-gattung	Trieb-fahrzeug	Wagenanzahl und -bauart	Masse inkl. durch-schn. Beladung (t)	Länge (m)	V _{max} (km/h)
Erzzug	GM	2x BR 189	40x Faals 151	5574	639	80
Erzzug leer	GML	2x BR 189	40x Faals 151	1574	639	120
Containerzug	TEC	BR 189	25x Sgnss 704	1414	512	120
Mischgüterzug	KC	BR 189	15x Habbills 3346	1218	381	100
Ganzzug	GB	BR 189	15x Eaos-x 051	1291	234	100

Tab. 1: Für den Güterverkehr wurden fünf verschiedene Modellzüge definiert.

Modells zu begrenzen. Deshalb kommt es beim Fahrzeugeinsatz teilweise zu geringen Abweichungen gegenüber der Realität. Die Auswahl der Personenzüge orientiert sich an den offiziellen Fahrzeugeinsätzen im Regelfahrplan.

Bei den Güterzügen musste aufgrund der Vielzahl an Typen, Zuglängen und Zugmassen eine Auswahl getroffen werden, die den Fahrzeugeinsatz bestmöglich abbildet. Eine wichtige Fahrzeuggattung auf der Strecke stellen Container- und Ganzzüge dar. Des Weiteren haben zahlreiche Mischgüterzüge im Einzelwagenladungsverkehr den Rangierbahnhof Maschen als Start bzw. Ziel. Unter den Ganzzügen gibt es als Besonderheit die Erzzüge von Hamburg nach Salzgitter. Eine Übersicht der Modellzüge findet sich in Tab. 1.

Die Hauptrelationen der Güterzugfahrten wurden mittels Linien abgebildet. Dabei wurden die Quell- und Zielgebiete vereinfachend zu einem einzigen Punkt zusammengefasst. So beginnen die Züge entweder in Hamburg-Hausbruch (Westhafen), Hamburg-Wilhelmsburg (Osthafen) oder Maschen und verkehren dann in Richtung Jesteburg/Bremen, Wieren/Stendal (südöstliche Richtung) oder Lehrte (südliche und südöstliche Richtung) (Tab. 2). Die Festlegung der Güterzugzahlen pro Linie basiert unter anderem auf vorherigen Studien sowie Daten aus der Lärmkartierung des Eisenbahnundesamts [13, 14].

Ausgangspunkt für die weitere Bearbeitung sind folgende Fahrplanvarianten:

- Fahrplan A: Personenzüge 2014 und

Linie	Modellzug	Linienverlauf	Güterzugtrassen innerhalb von 24 Stunden, beide Richtungen
11	Container, Ganzzug	Hamburg-Hausbruch – Lehrte	102
12	Container, Ganzzug	Hamburg-Hausbruch – Wieren	20
13	Container, Ganzzug	Hamburg-Hausbruch – Jesteburg	98
21	Container, Ganzzug	Hamburg-Wilhelmsburg – Lehrte	34
22	Container, Ganzzug	Hamburg-Wilhelmsburg – Wieren	6
23	Container, Ganzzug	Hamburg-Wilhelmsburg – Jesteburg	32
31	Mischgüterzug	Maschen – Lehrte	24
32	Mischgüterzug	Maschen – Wieren	4
33	Mischgüterzug	Maschen – Jesteburg	22
41	Erzzug	Hamburg-Hausbruch – Lehrte	8
		Summe Güterzüge	350

Tab. 2: Anzahl der Güterzüge nach Typ und Linie

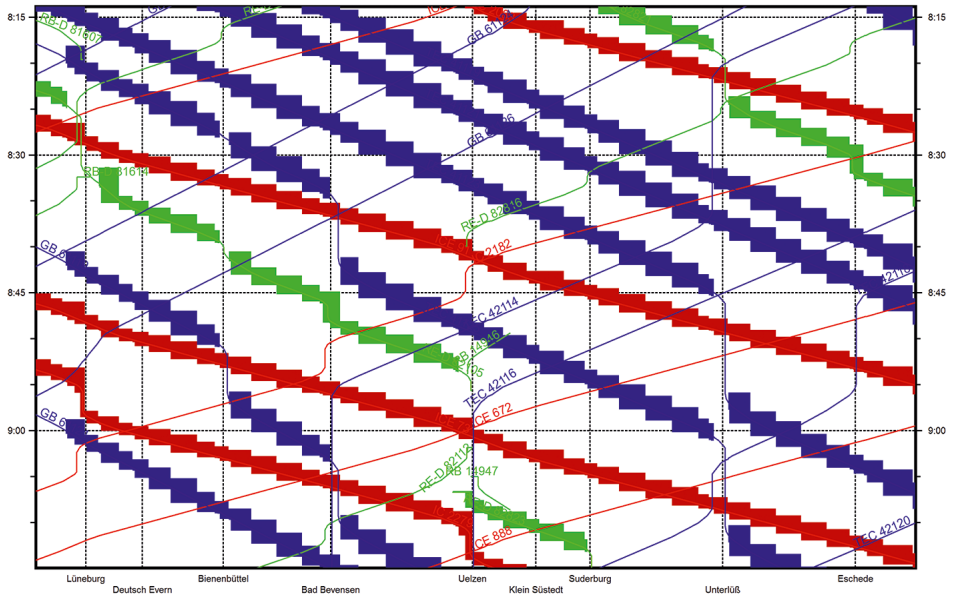


Abb. 1: Aktueller Zugverkehr (Fahrplan B) auf der Strecke Hamburg Richtung Hannover, Bildfahrplanausschnitt aus RailSys

- Fahrplan B: Personenzüge 2014 sowie Güterzüge.
- Die modifizierte Version wurde mit C bezeichnet:
- Fahrplan C: gleiche Züge wie Fahrplan B, veränderte Geschwindigkeiten und Fahrlagen.

Fahrplan A diene als Zwischenschritt zur exakten Nachbildung des Personenverkehrs im Untersuchungsraum. In Fahrplan B wurden die Güterzüge ergänzt, diese Variante stellt demzufolge den Status quo aus 2014 dar. Fahrplan C beinhaltet die geplanten Modifikationen mit dem Ziel einer Verringerung des Gesamtenergiebedarfs.

3 Möglichkeiten der Energieeinsparung durch Änderung des Fahrplans

3.1 Analyse des aktuellen Fahrplans

Abb. 1 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt aus dem Bildfahrplan der Modell-

strecke (Nr. 1720) von Hamburg Richtung Hannover im Zeitfenster von 8.15 bis 9.05 Uhr. Die verschiedenen Zugarten sind farblich differenziert: Personenfernverkehr (rot), Regionalverkehr (grün) und Güterverkehr (blau). Die Güterzüge besitzen gegenüber den Personenzügen eine niedrigere Priorität, da sie langsamer sind. Deshalb müssen sie in vielen Fällen abbrem sen, in Überholgleise einfahren und Personenzüge passieren lassen. Einerseits nimmt aufgrund der zahlreichen Überholungshalte der Energiebedarf zu, andererseits wird die Kapazität der Strecke gemindert. Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Personen- und Güterverkehrs, die an den Neigungen der Linien im Bildfahrplan erkennbar sind, reduzieren die Kapazität der Strecke. Eine einzelne Fernverkehrstrasse kann mehrere Güterzugtrassen negativ beeinflussen und die Güterzüge an einer gleichmäßigen Fahrt hindern.

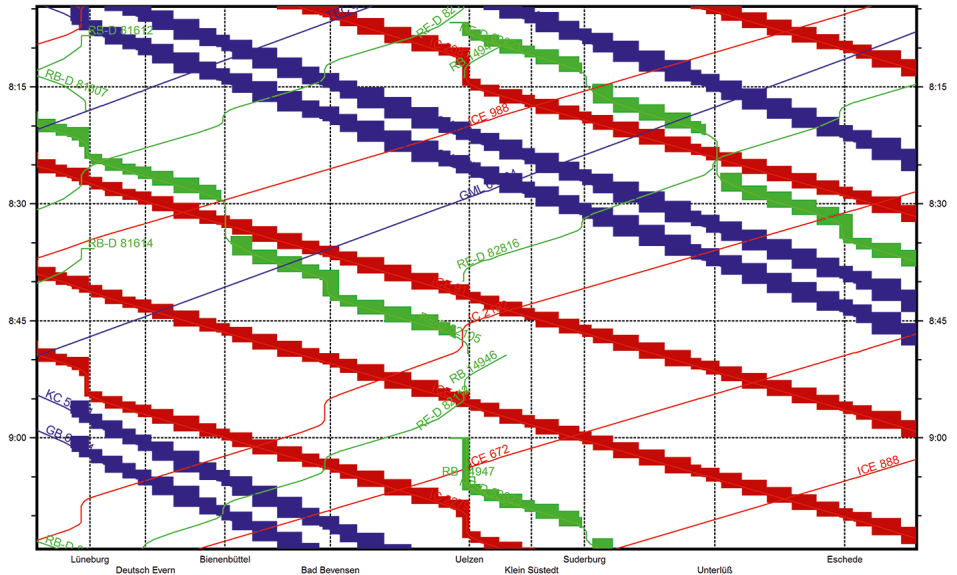


Abb. 2: Bei Reduzierung der Fernverkehrsgeschwindigkeit auf ca. 150 km/h sind keine Güterzugüberholungen mehr notwendig (Fahrplan C), Bildfahrplanausschnitt aus RailSys

3.2 Möglichkeiten der Fahrplanmodifikation

In dieser Untersuchung wird eine betriebliche Energieverbrauchsoptimierung im Rahmen der Fahrplankonstruktion angestrebt. Abb. 3 ordnet die energieoptimierte Fahrplangestaltung („Fahrplankonstruktion“) in den Gesamtkontext der Energiebedarfsoptimierung im Eisenbahnbereich ein.

Im Eisenbahnbetrieb treten vor allem beim Beschleunigen und bei der Beharrungsfahrt bei hoher Geschwindigkeit große Energiebedarfe auf. Als Handlungsoptionen bieten sich das Vermeiden von unnötigen Beschleunigungsvorgängen und eine Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit an. Der Personenverkehr kann zu einer Energieeinsparung beitragen, indem er langsamer als üblich verkehrt. Die Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit ist insbesondere bei Personenzügen problematisch, da dies zu verlängerten Reisezeiten führt und die Streckenhöchstgeschwin-

digkeit inkl. der dafür installierten besonderen Technik (Linienzugbeeinflussung LZB) nicht mehr genutzt wird. Die Güterzüge können energiesparend verkehren, wenn die Anzahl der Überholungshalte reduziert bzw. auch hier die Geschwindigkeit reduziert wird. Abb. 4 zeigt beispielhaft den Energiemehrbedarf durch häufige Überholungshalte.

Das Diagramm enthält Fahrdynamikdaten von zwei Güterzügen aus Fahrplan B. Auf der x-Achse ist der Laufweg in Kilometern angegeben. Die y-Achse zeigt den kumulierten Energiebedarf in kWh. Die Überholungshalte sind durch rote Kreismarkierungen gekennzeichnet. Das untersuchte Güterzugpaar verkehrt über die gleichen Strecken und befährt die gleichen Fahrstraßen-Abfolgen. Während der erste Güterzug nachts behinderungsfrei verkehren kann, ist die Fahrt des zweiten Güterzugs tagsüber durch mehrere Überholungen unterbrochen. Gelingt

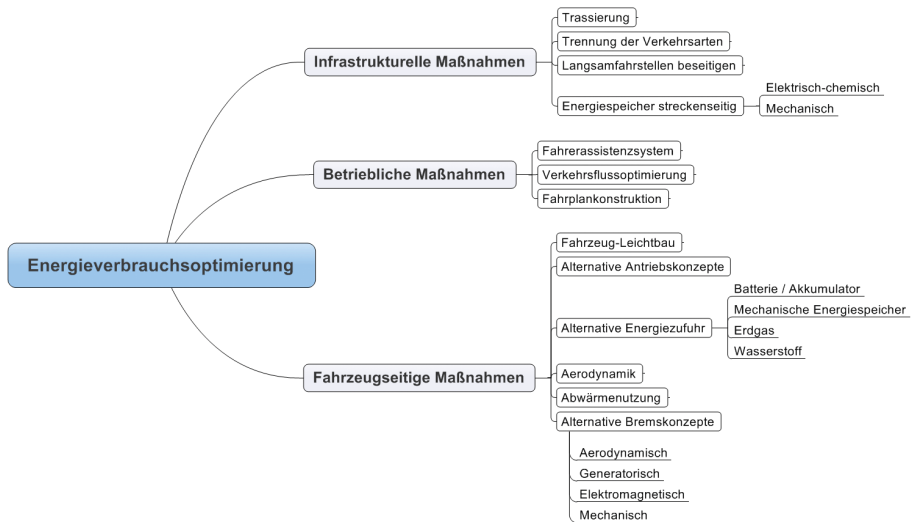


Abb. 3: Übersicht über Maßnahmen zur Energieverbrauchsoptimierung [15]

es nun, die Überholungen zu vermeiden oder ihre Zahl zu reduzieren, dann könnte ein erhebliches Einsparpotenzial erschlossen werden. Im vorliegenden Beispiel konnte der Energiebedarf von 2594

auf 2171 kWh gesenkt werden, also eine Einsparung von rund 19%. Allerdings erfordert die Verringerung von Überholungshalten starke Eingriffe in den bestehenden Fahrplan.

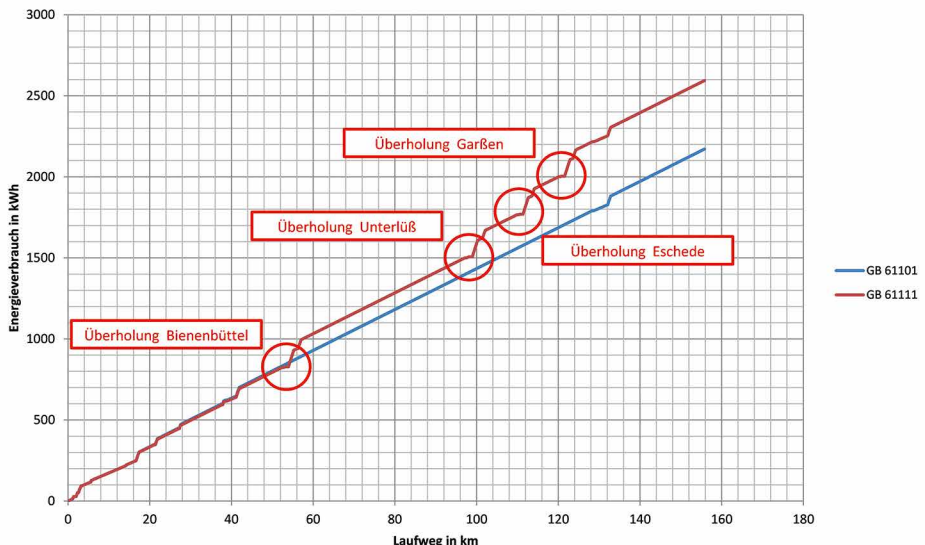


Abb. 4: Energiemehrbedarf durch vier Überholungshalte gegenüber überholungsfreier Fahrt

Die Vermeidung von Überholungen ist eng verknüpft mit der Harmonisierung der Geschwindigkeitsprofile. Dafür müssen sich die Geschwindigkeiten beider Zugarten annähern.

Eine weitere Möglichkeit zur effektiveren Streckenausnutzung ist das Anlegen von Trassenbündeln. So ist beispielsweise denkbar, zunächst drei schnell fahrende Züge (z. B. ICE, ICE, IC) und anschließend drei Nahverkehrszüge fahren zu lassen, gefolgt von drei Güterzügen gleichen Typs und gleicher Geschwindigkeit. Problematisch an diesem Ansatz ist allerdings, dass damit deutschlandweit Anpassungen am Fahrplan durchgeführt werden müssten. Insbesondere im Personenverkehr würden damit viele Anschlussbeziehungen auch noch in entfernten Teilen der Republik verloren gehen.

3.3 Umsetzung der Harmonisierung der Geschwindigkeiten

Um die Zahl der Güterzug-Überholungen zu reduzieren, werden im Fahrplan C die Personenfernzüge verlangsamt. Es wurde keine optimale Geschwindigkeit ermittelt, sondern eine maximale Fahrzeitverlängerung von 20 % definiert. Da der Fahrplan nicht generisch erstellt werden kann, musste hier ein konkreter Wert festgelegt werden. Somit ergibt sich kein übertragbares Ergebnis, allerdings lässt sich die Tendenz erkennen. Die Güterzüge verkehren mit der gleichen Höchstgeschwindigkeit wie in Fahrplan B (verschiedene Geschwindigkeitsklassen von 80 bis 120 km/h je nach Gattung). Sowohl die Trassen des Personenfernverkehrs als auch des Schienengüterverkehrs sind in ihren zeitlichen Lagen verändert worden. Lediglich die Fahrplantrassen des Nahverkehrs konnten unverändert belassen werden. Güterzüge verkehren wie auch in Fahrplan B teilweise als Trassenbündel, allerdings mit maximal drei Zügen gleichen Typs hintereinander. Der Personenfernverkehr hat weiterhin

Vorrang vor dem Güterverkehr und dem Regionalverkehr.

Die Neuausrichtung der Fernverkehrsstrassen erfolgte anhand des Knotens Hannover, um die zahlreichen Anschlüsse in diesem wichtigen Knotenpunkt nicht zu gefährden und Effekte in das nachgelagerte südliche Netz zu vermeiden. In Hannover Hbf behalten die Fernzüge somit ihre Abfahrts- und Ankunftszeiten.

Der Fahrplan C, der in Abb. 2 dargestellt ist, weist im Vergleich zu Fahrplan B eine homogenere Struktur auf, da sich die Geschwindigkeiten der unterschiedlichen Zuggattungen angenähert haben. Der Nahverkehr ist unverändert, sodass die Regionalzüge weiterhin von den anderen Zügen überholt werden. Ein unerwartetes Ergebnis ist, dass am ganzen Tag keine Güterzugüberholungen mehr notwendig sind. Im Fahrplan B waren noch 120 Überholungen notwendig.

4 Auswirkungen aus verschiedenen Perspektiven

4.1 Energieeinsparung

Über den gesamten Tagesablauf führen die in 4.1 genannten Maßnahmen zu einer durchschnittlichen Energieeinsparung von 9,7 % (107 900 kWh). Die Ergebnisse sind in Abb. 5 dargestellt. Die größten Einsparungen sind nicht im Güterverkehr, sondern im Personenfernverkehr zu verzeichnen. Hier sinkt der Bedarf um rund 29 %. Im Nahverkehr kommt es zu keinen nennenswerten Änderungen. Der Güterverkehr kann 2,7 % der Energie sparen. Die Analyse nach Zeitscheiben ergibt folgendes Bild: Tagsüber (6.00 – 22.00 Uhr) ist der Fahrplan von einem starken Mischbetrieb geprägt. Stattdessen findet nachts (22.00 – 6.00 Uhr) nahezu ausschließlich Güterverkehr statt, abgesehen von einigen nächtlichen Fernzügen und einzelnen Fahrten des Nahverkehrs (sehr wenige Überholungen). Die größten Anpassungen

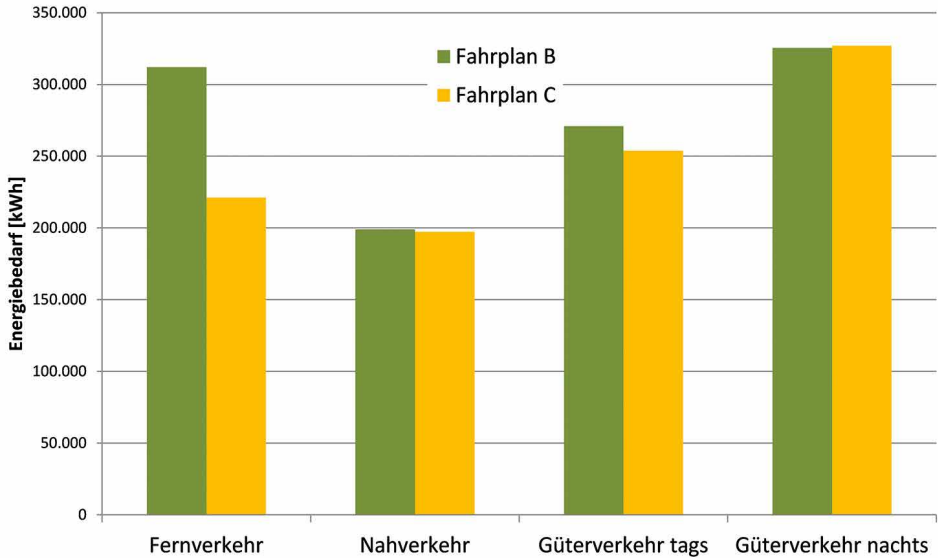


Abb. 5: Die größte Energieeinsparung wird im Fernverkehr realisiert, tagsüber sinkt der Energiebedarf im Güterverkehr aufgrund wegfallender Überholungen.

finden in der Tageszeitscheibe statt. Hier lassen sich die Auswirkungen der vermiedenen Überholungen erkennen. Von Fahrplan B zu C kann beim Güterverkehr eine Einsparung von 6,3 % erzielt werden. Nachts ist der Energiebedarf geringfügig höher, da aufgrund verstärkter Trassenbündelung mehr Güterzüge unterwegs sind. Der Vergleich der beiden Zeitscheiben zeigt, dass die Reduktion von Güterzugüberholungen bei starkem Mischbetrieb zu nennenswerten Einsparungen beim Gesamtenergiebedarf führt, auch wenn die größten Einsparungen durch den Verzicht auf die Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h im ICE/IC-Verkehr erreicht werden.

Eine Einbeziehung der Rückspeisung verringert den Nutzen der Maßnahmen in Fahrplan C. Im Fernverkehr verringern sich die Einsparungen geringfügig auf 27 %, im Güterverkehr hingegen halbieren sich die Einsparungen auf 1,2 %. Ursache

ist, dass ein nennenswerter Teil der Bremsenergie bei Überholungshalten zurückgespeist werden kann und bei Fahrplan C die Fahrt bei Höchstgeschwindigkeit im Bereich des Überholungshaltes erhebliche Energie benötigt. Wenn wie oben der Tages- und Nachtbetrieb differenziert betrachtet wird, liegt die Ersparnis im Güterverkehr tagsüber bei 3,8 %.

4.2 Fahrzeitänderungen

Die Verlangsamung des Personenfernverkehrs lässt die Fahrzeiten auf der Strecke Hamburg – Hannover ansteigen. Die Höchstgeschwindigkeit der Fernzüge verringert sich von bis zu 200 km/h auf nur noch 140 bis 150 km/h. So benötigt der ICE auf der Fahrt von Hamburg nach Hannover nun 86 statt 75 Minuten. Beim IC erhöht sich die Fahrtdauer von 90 auf 97 Minuten. Die Attraktivität des Personenfernverkehrs sinkt. Infolge der wegfallenden Wartezeiten in Überhol-

Abgangswege zu den Bahnhöfen der Städte spielen für die Berechnung der Reisezeit ebenso eine Rolle.

Insgesamt gehen die Fahrgastzahlen deutschlandweit bei Fahrten über 50 km Länge von 148,5 Mio. auf 147,9 Mio. pro Jahr zurück. Die Strecke Hamburg – Hannover verliert ca. 1,3 Mio. Fahrgäste im Querschnitt (Rückgang von 11,22 Mio. auf 9,87 Mio.). Ein erheblicher Teil davon geht aber dem System Bahn nicht verloren, sondern wandert auf die Strecke Dortmund – Bremen – Hamburg ab, wo 0,5 Mio. Fahrgäste mehr unterwegs sind. Die Veränderungen sind in Abb. 6 ersichtlich.

In Hamburg selbst sinkt die Zahl der Fahrgäste mit dortigem Start oder Ziel von 14,01 auf 13,69 Mio. Insgesamt geht die Verkehrsleistung von 45,339 auf 45,066 Mrd. Personen-km zurück. Dies ist ein Verlust von 272 Mio. Personen-km.

4.4 Lärm

Die Auswirkung auf die Lärmemissionen wurde beispielhaft anhand Schall 03 [17] der ermittelt. Hierzu wurde ein Immissionsort nahe Lüneburg in 25 m Entfernung zur Strecke ohne Schallschutzwand angenommen. Ausgangspunkt ist ein Nachtpegel (74,4 dB(A)), der höher liegt als der Tagespegel (71,2 dB(A)), da nachts mehr Güterzüge verkehren. Im Fahrplan C gibt es nur geringe Änderungen. Nachts steigt der Pegel um 0,3 dB(A) an, da die Trassenbündelung gleich schneller Güterzüge noch höhere Zugzahlen ermöglicht (109 statt 104 Güterzüge). Tagsüber sinkt der Pegel um 0,3 dB(A), da die Zugzahl geringfügig zurückgeht und die ICE/IC-Züge langsamer fahren. Der Einfluss des Personenfernverkehrs ist aber bei dem vorliegenden Zugmix irrelevant. Es lässt sich zusammenfassend sagen, dass das Fahrplankonzept C bei der hohen Grundlast an Zügen keine Auswirkungen auf die Lärmemissionen hat.

4.5 Kapazitätsgewinn

Durch die Harmonisierung der Geschwindigkeiten der Verkehrsarten erhöht sich die Streckenkapazität. Dies ist nicht Fokus der Untersuchung, aber dennoch einer der größten Nutzenaspekte des Fahrplankonzepts. Um den Trassengewinn zu quantifizieren, wurden der originale und der modifizierte Fahrplan entsprechend der DB-Konzernrichtlinie 405 (Fahrwegkapazität) maximal mit Güterzügen gefüllt. Die Differenz der beiden Werte kann als Kapazitätsgewinn des Konzepts angesehen werden. Bei der Untersuchung konnten 24 zusätzliche Güterzugtrassen pro Tag zwischen Lehrte sowie Hamburg-Hausbruch, -Wilhelmsburg und Maschen geschaffen werden. Die Streckenkapazität erhöht sich damit um ca. 4 %, bzw. 9 %, wenn nur die Güterzüge betrachtet werden.

5 Wirtschaftliche Bewertung

Damit keine Schlussfolgerungen allein aus Perspektive des Energieverbrauchs gezogen werden, wurden die Ergebnisse monetarisiert. Dabei wurden verschiedene Perspektiven eingenommen, um die verschiedenen Stakeholder einzubeziehen [18]. Die primäre Sichtweise ist natürlich die der Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), gefolgt von denen des Infrastrukturbetreibers (EIU). Aber auch die Perspektive der Fahrgäste, der Güterkunden und der Umwelt sollen nicht außer Acht gelassen werden.

5.1 Perspektive der Bahnunternehmen

Die Verkehrsunternehmen des Güterverkehrs sparen durch das Fahrplankonzept 700 000 EUR an Energiekosten pro Jahr. Wenn man die Rückspeisung einbezieht, bei der ca. 6 % der Traktionsenergie zurückgewonnen werden kann und die mit ca. 75 % des Verbrauchspreises vergütet wird [19], sinken die Einsparungen auf 430 000 EUR pro Jahr. Dies entspricht

einem Anteil von 1,7% der Energiekosten. Im Fernverkehr sind die Energieeinsparungen deutlich größer, hier können 3,86 Mio. EUR pro Jahr, unter Berücksichtigung der Rückspeisung (12% der Traktionsenergie) 3,36 Mio. EUR pro Jahr erzielt werden.

Aus Perspektive der Güterverkehrsunternehmen kann die Verkürzung der Fahrzeit der Güterzüge positiv angerechnet werden. Bei der Bedarfsplanüberprüfung 2010 des Bundesverkehrswegeplans [12] können bei einem Containerzug mit 25 Wagen 194 EUR/Zug-Stunde im Güterverkehr angesetzt werden. Bei einer Fahrzeitverkürzung von 31,4 Stunden pro Tag können jährlich 1,28 Mio. EUR an Kosteneinsparung erzielt werden.

Schließlich kann die erhöhte Kapazität für zusätzliche Zugfahrten genutzt werden, die bei DB Netz zu 2,9 Mio. EUR an zusätzlichen Trasseneinnahmen führen, wenn nur der Laufwegabschnitt Hamburg – Hannover betrachtet wird.

Alle Einsparungen verblassen allerdings im Hinblick auf die Einnahmeverluste im Fernverkehr. Der durchschnittliche Fahrpreis liegt bei 10,7 EUR-Cent pro Personen-km, ein Wert, der sich aus dem Geschäftsbericht der DB Fernverkehr ableiten lässt [20]. Die durchschnittlichen Erlöse

des DB Fernverkehrs liegen demnach noch unter der Hälfte des Normalpreises für die 2. Klasse. Der Verlust von deutschlandweit 272 Mio. Personen-km führt somit zu einem Einnahmeverlust von 29,2 Mio. EUR pro Jahr. Dieser ist somit um ein Vielfaches größer als die eingesparten Energiekosten (Abb. 7).

5.2 Perspektive der Fahrgäste

Die Verlangsamung des Personenfernverkehrs bewirkt für den oben quantifizierten Teil der Fahrgäste die Wahl eines anderen Verkehrsmittels. Dabei kann es sich sowohl um das Flugzeug (z.B. zwischen München und Hamburg) als auch den Fernbus, Mitfahrzentralen oder den Pkw handeln. Aus Gründen der Einfachheit wird angenommen, dass alle abwandernden Fahrgäste den Pkw benutzen. Entsprechend der Kostensätze des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) 2010 (11,8 Cent/Pkw-Personen-km) sind die Betriebskosten hierbei aber etwas größer als die Einsparungen durch die nicht erforderlichen Fahrkarten. Sie liegen bei 32,1 Mio. EUR pro Jahr und damit leicht über den eingesparten Ticketpreisen. Die Entscheidung für die etwas teurere Pkw-Fahrt geschieht aus Gründen der Reisezeit, die an dieser Stelle nicht explizit monetarisiert wird.

Betriebswirtschaftliche Auswirkungen aus Sicht der Bahnen



Abb. 7: Die Einnahmeverluste des Fernverkehrs werden nicht durch Energieeinsparungen oder erhöhte Trassenerlöse kompensiert.

5.3 Perspektive der Güterkunden

Die Schaffung neuer Güterzugtrassen kann bei entsprechendem Bedarf zur Verlagerung von der Straße auf die Schiene führen. In Anbetracht des stark steigenden Hafenhinterlandverkehrs und der Engpasssituation der Strecke kann davon ausgegangen werden, dass alle neuen Trassen auch in Anspruch genommen werden.

Auslastungsbetrachtungen verschiedener Güterzugarten lassen einen Pauschalwert von 30 ersetzten Lkw pro Zug als guten Mittelwert erscheinen. Da die Auslastung insbesondere der Züge des kombinierten Verkehrs im Hafenhinterlandverkehr in den letzten Jahren zugenommen hat, kann sogar noch mit höherem Nutzen gerechnet werden. Da eine deutschland- bzw. europaweite Betrachtung zu komplex geworden wäre, wird im Folgenden nur der Transportteil des Gutes betrachtet, der zwischen Hannover und Hamburg stattfindet. Mit 1,66 EUR pro Lkw-km [12] liegen die Kosten deutlich höher als mit 2,50 EUR pro Zug-km. Der Transport mit dem Lkw ist also zwanzigmal teurer als mit der Bahn. Insgesamt ergeben sich damit bei 210 Verkehrstagen pro Jahr Einsparungen aus Sicht der Verlader von 40,6 Mio. EUR.

Aus Perspektive der Güterkunden ist zumindest mit den Kostensätzen des BVWP die Verlangsamung des Personenverkehrs sinnvoll.

5.4 Perspektive der Umwelt

Die Verlagerungen im Personen- und Güterverkehr haben noch Effekte auf die externen Kosten, die aber – wie in der Realität – kaum im Fokus der Passagiere oder Güterverkehrskunden liegen. Auf Basis der Kostensätze des BVWP wurden die folgenden Zahlen berechnet.

Im Personenverkehr entstehen zusätzliche Abgaskosten von 1,8 Mio. EUR pro Jahr, während es keine Reduzierung derselben im Bahnverkehr gibt, da ja alle Züge wei-

terhin fahren. Die Unfallfolgekosten steigen um 4,2 Mio. EUR pro Jahr.

Im Güterverkehr sinken die Lkw-Abgaskosten durch die Verlagerung um 2,1 Mio. EUR, während die CO₂-Emissionskosten im Zugverkehr um 0,7 Mio. EUR steigen. Die Unfallfolgekosten im Lkw-Verkehr sinken um 0,7 Mio. EUR, während sie im Bahnverkehr um 0,2 Mio. EUR steigen. Alles in allem ist die Größenordnung der externen Kosten bei den verhältnismäßig niedrigen Verlagerungszahlen gegenüber den betriebswirtschaftlichen Summen vernachlässigbar.

5.5 Zusammenfassung

In der Tab. 3 auf der nächsten Seite werden alle Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbewertung zusammengefasst. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass im Unterschied zum BVWP bei der Stakeholder-Betrachtung keine Summierung aller positiven und negativen Nutzelemente vorgenommen wird.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Steigende Energiekosten sind Anlass, Möglichkeiten des energieeffizienten Bahnbetriebs auf verschiedenen Ebenen zu untersuchen. Neben der Möglichkeit, die Fahrweise und den Betriebsablauf im Störfall zu optimieren, werden hier Optionen für einen energieoptimierten Soll-Fahrplan untersucht. Als Grundlage wird die hoch ausgelastete bzw. teilweise überlastete Strecke Hamburg – Hannover gewählt und eine mikroskopische Simulation durchgeführt.

Überholungen von Güterzügen bewirken einen erhöhten Energiebedarf, daher wurde in einem Szenario eine Harmonisierung der Geschwindigkeiten durchgeführt. Hierbei wurde der Personenfernverkehr auf ca. 150 km/h verlangsamt. Dadurch können alle Güterzüge überholungsfrei die Gesamtstrecke befahren. Die größten

Nutzenelement	Nutzen pro Jahr [Mio. EUR/Jahr]
Perspektive des Güter-EVU	
Energieeinsparung (Rekuperation berücksichtigt)	0,43
Zeiteinsparung	1,28
Perspektive des FV (DB Fernverkehr)	
Energieeinsparung (Rekuperation berücksichtigt)	3,36
Einnahmeverluste	-29,16
Perspektive des EIU (DB Netz)	
Erlöse durch neue Güterzugtrassen	2,9
Perspektive der abwandernden Fahrgäste	
eingesparte Zugtickets	29,16
Pkw-Betriebskosten	-32,05
Perspektive der Güterverkehrskunden	
Eingesparte Lkw-Betriebskosten	42,67
neue Zugförderkosten	-2,14
Perspektive der Umwelt/Allgemeinheit	
Pkw-Abgaskosten	-1,76
Pkw-Unfallfolgekosten	-4,17
Lkw-Abgasvermeidungskosten	1,47
Lkw-Unfallfolgekostenvermeidung	0,67
CO ₂ -Emissionskosten neue Güterzüge	-0,67
Unfallfolgekosten neue Güterzüge	-0,25
Eine Summierung der Nutzen über die verschiedenen Perspektiven erfolgt bewusst nicht.	

Tab. 3: Zusammenstellung des betriebs- und volkswirtschaftlichen Nutzens des Fahrplans C vs. B

Energieeinsparungen zeigten sich jedoch beim Fernverkehr aufgrund der geringeren Geschwindigkeit.

Um die Bewertung nicht nur aus Perspektive des Energiebedarfs durchzuführen, wurden auch die Themen Lärm, Kapazität, Nachfrage und weitere volkswirtschaftliche Aspekte betrachtet. Hierbei zeigte sich, dass die Fahrzeitverlängerung aus betriebswirtschaftlicher Sicht bei den Bahnunternehmen mehr Kosten als Nutzen bringt. Die Einnahmeverluste durch abwandernde Fahrgäste übersteigen die Energieeinsparungen, die Optimierung im

Güterverkehr und die steigenden Trassen-erlöse durch Kapazitätserhöhung stark. Erst aus volkswirtschaftlicher Perspektive kann mit den Bewertungsansätzen des Bundesverkehrswegeplans ein positiver Nutzen durch verlagerten Lkw-Verkehr erzielt werden.

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass energieeffiziente Fahrweise und Verkehrsflussoptimierung sinnvoll sind und nicht die negativen Auswirkungen der hier untersuchten Szenarien aufweisen. Bei einer Optimierung des Soll-Fahrplans wird empfohlen, eine Harmonisierung der

Geschwindigkeiten nur innerhalb der Güterzüge zu untersuchen. Dies kann sowohl durch Reduzierung auf 100 km/h als auch Anhebung auf z.B. 140 km/h geschehen. Für den letzteren Fall nähert sich die Geschwindigkeit dem Personenverkehr an und macht dem Güterverkehr neue Trassen verfügbar.

Quellen:

- [1] „Der Schienengüterverkehr muss wettbewerbsfähig bleiben – Die Auswirkungen politischer Rahmensetzung auf die Produktionskosten der Güterbahnen“, Positionspapier, Köln, Mai 2015, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV)
- [2] „Analyse staatlich induzierter Kostensteigerungen im Schienengüterverkehr am Beispiel von ausgewählten Relationen“, hwh Gesellschaft für Transport- und Unternehmensberatung mbH, Karlsruhe, 2015, im Auftrag der Interessensgemeinschaft der Bahnspediteure (IBS) e.V., Berlin und UIRR International Union for Road-Rail Combined Transport, Brüssel
- [3] Schumann, T.: „Fahrerassistenz und Betriebsoptimierung im Bahnverkehr (Schwerpunkt: Güterverkehr)“, In: Vorlesung „Schienengüterverkehr“, TU Berlin, 20. Mai 2014, DLR Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig
- [4] Scheier, B.; Schumann, T.; Kohlruss, J.: „Dispositionsstrategien für einen energieeffizienten Bahnbetrieb“, In: EI – Der Eisenbahningenieur, 1/2013, DVV Media Group, Hamburg, S. 48 – 52
- [5] Schienennetz-Benutzungsbedingungen, DB Netz AG, 2014
- [6] Kotzagiorgis, St.: „Dialogforum Schiene Nord – Lösungsmöglichkeiten für die Engpässe der Schieneninfrastruktur im Raum Hamburg – Bremen – Hannover“, BVU Wirtschaft + Verkehr GmbH, Freiburg, Mai 2015
- [7] Hafen Hamburg Marketing e.V., Containerumschlag 1990 bis 2014, <http://www.hafen-hamburg.de/de/statistiken/containerumschlag>, Zugriff am 12. Mai 2015
- [8] Runge, W.-R.: „Was kann die Bahn auf ihren Strecken wirklich leisten?“, In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, 3/1996, S. 127 – 135
- [9] Berschin, F.: „Hamburg – Hannover: Mehrverkehr wäre schon heute möglich“, In: Bahn-Report, 6/09, S. 76 – 78
- [10] „Die Veerßer Kurve bringt eine Entlastung des Knotens Uelzen“, Rail Business 23/2011, S. 5, DVV Media Group, Hamburg
- [11] Eickmann, C.; Kohlruss, J.; Schumann, T.: „Hafen-hinterlandanbindung – Sinnvolle Koordination von Maßnahmen im Schienenverkehr zur Bewältigung des zu erwartenden Verkehrsaufkommens“, Studie, 15. Oktober 2008, DLR Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig
- [12] „Überprüfung des Bedarfsplans für die Bundes-schienenwege“, Abschlussbericht November 2010, korrigierte Version 29. November 2010, BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH, Freiburg, INTRAPLAN Consult GmbH, München
- [13] „Schienennetz 2025/2030 – Ausbaukonzeption für einen leistungsfähigen Schienengüterverkehr in Deutschland“, KCW GmbH, Berlin, im Auftrag des Umweltbundesamts, Dessau, 2010
- [14] Umgebungslärmkartierung des Eisenbahnbundesamts, <http://laermkartierung1.eisenbahn-bundesamt.de/mb3/app.php/application/eba>, Zugriff 3. Februar 2015
- [15] Scheier, B.; Schumann, T.; Meyer zu Hörste, M.; Dittus, H.; Winter, J.: „Wissenschaftliche Ansätze für einen energieoptimierten Eisenbahnbetrieb“, In: Eisenbahn Ingenieur Kalender 2014, DVV Media Group, Hamburg
- [16] Schumann, T.; Lemmer, K.: „Next Generation Train – neue Potenziale für den europäischen HGV“, In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, 1 – 2/2013
- [17] Bundes-Immissionsschutzgesetz, Anlage 2, „Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03)“, überarbeitete Fassung, 2. August 2013
- [18] Böhm, T.; Bussmann, A.; Scheier, B.: „Integrierte Bewertung von Schieneninfrastrukturmaßnahmen – Transparenz der Auswirkungen auf alle Stakeholder“, In: IZBE Symposium, Verkehrsinfrastruktur für unsere Zukunft, 23. – 24. April 2015, Dresden
- [19] Bundesnetzagentur, „Marktuntersuchung Eisenbahn 2013“, Bonn, Dezember 2013, S. 42
- [20] Geschäftsbericht 2013, DB Fernverkehr AG, Frankfurt/Main

